

## 粘弹性颗粒驱油剂的流变特性

吴亚红<sup>1</sup>, 姜祖明<sup>2</sup>, 李振泉<sup>3</sup>, 曹绪龙<sup>2</sup>, 宋新旺<sup>2</sup>, 郭兰磊<sup>2</sup>, 刘灵灵<sup>4</sup>

(1. 中国石油大学(北京)石油天然气工程学院, 北京 102249; 2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015; 3. 中国石化胜利油田分公司技术监督处, 山东 东营 257001; 4. 中国石化胜利油田分公司技术检测中心, 山东 东营 257000)

**摘要:**粘弹性颗粒驱油剂 B-PPG 是一种全新的驱油剂, 具有部分交联、部分支化的分子结构, 分散于水中形成非均相的 B-PPG 悬浮液。采用稳态剪切和动态振荡实验, 研究了不同质量分数、不同交联度的 B-PPG 在不同矿化度盐水中的流变特性, 并分析其产生机理。结果表明, B-PPG 悬浮液具有优异的粘弹性、耐盐性和增粘性。随着 B-PPG 交联度的增加, B-PPG 悬浮液粘度呈下降趋势, B-PPG 悬浮液粘性与弹性模量交点处频率 ( $F_c$ ) 逐渐趋向低频; 高矿化度使部分水解聚丙烯酰胺 (HPAM) 溶液的弹性减弱, 而对 B-PPG 悬浮液模量影响较小, 表明 B-PPG 较 HPAM 具有更优异的耐盐性; 随着 B-PPG 质量分数的增大, B-PPG 悬浮液线性粘弹区范围增大, 且粘度明显增大, B-PPG 悬浮液更加偏离牛顿流体,  $F_c$  值逐渐趋向低频; 通过对其动态振荡曲线的线性拟合数据发现, B-PPG 悬浮液表现出弱凝胶特性。

**关键词:** 部分交联 粘弹性颗粒驱油剂 流变特性 弱凝胶 非均质

中图分类号: TE357.431

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2015)04-0087-06

## Rheological properties of branched-preformed particle gel

Wu Yahong<sup>1</sup>, Jiang Zuming<sup>2</sup>, Li Zhenquan<sup>3</sup>, Cao Xulong<sup>2</sup>, Song Xinwang<sup>2</sup>, Guo Lanlei<sup>2</sup>, Liu Lingling<sup>4</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 3. Technical Supervision Department, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257001, China; 4. Technology Inspection Center, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

**Abstract:** Branched-preformed particle gel (B-PPG) is a novel oil displacement agent, which has a crosslinked network and linear branched chains. When mixed with water or brine, B-PPG is not dissolved completely and the produced mixture is a heterogeneous suspension system. The rheological properties of B-PPG with different concentrations and different crosslinked degrees in brine were studied by steady shear and dynamic oscillation test; and the mechanism was also discussed from the viewpoint of molecular structure. The results show that B-PPG suspension has excellent viscoelasticity, salt tolerance and rheological properties. With the increase of crosslinked degree, the viscosity of B-PPG suspension decreases, as well as the frequency at crossing point of viscosity and elasticity ( $F_c$ ). High salinity makes the elasticity of HPAM solution decrease and has few effects on B-PPG, which proves that B-PPG has better salt tolerance. The viscosity and linear viscoelastic region of B-PPG suspension increase and  $F_c$  decreases with increasing concentration. Moreover, B-PPG suspension shows weak gel character by linear fitting of dynamic oscillation curve.

**Key words:** partially crosslink; branched-preformed particle gel (B-PPG); rheological property; weak gel; heterogeneous

收稿日期: 2015-05-04。

作者简介: 吴亚红(1966—), 女, 河南确山人, 高级工程师, 博士, 从事油气田开发工程方面的教学和科研工作。联系电话: 13910715837, E-mail: wuyahong66@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“高温高盐油田化学驱提高采收率技术”(2011ZX05011), 中国博士后科学基金资助项目“新型粘弹性颗粒驱油剂的制备与性能研究”(2014M560573)。

扩大驱替液的波及体积和洗油效率<sup>[1-4]</sup>是提高原油采收率的主要途径,中国油田开发层系多,层间和层内非均质性较强,进入高含水和特高含水期时,地层波及系数小,采收率低<sup>[5-9]</sup>。对于强非均质性油藏,扩大波及体积比提高洗油效率更为有效<sup>[10-11]</sup>。为此,孙焕泉等合成了粘弹性颗粒驱油剂B-PPG<sup>[12-16]</sup>,该驱油剂具有部分交联结构和部分支化分子结构,性能上兼具线性聚丙烯酰胺和交联聚丙烯酰胺的双重优点,在非均质性油藏中可达到边调边驱的效果<sup>[17]</sup>,有望在聚合物驱后油藏和强非均质性油藏中得到广泛应用。B-PPG分散于水中形成一种非均相的聚合物悬浮液,具有独特的流变性能,为此,笔者对B-PPG悬浮液的流变性能进行研究,以期对B-PPG的性能改进和应用提供依据。

## 1 实验器材与步骤

### 1.1 实验器材

实验仪器主要包括TA AR2000ex旋转流变仪、FA1004电子天平和电磁搅拌器。

实验试剂主要包括氯化钠、氯化钙、六水合氯化镁、硫酸钠,均为国药集团化学试剂有限公司生产的分析纯。B-PPG为自制样品,粒度为150目。部分水解聚丙烯酰胺样品的相对分子质量约为 $2\ 200 \times 10^4$ ,水解度为25%。所用盐水为根据胜利油区不同油藏矿化度及盐离子质量浓度配制的模拟水,配方如表1所示,如未特别指明,实验所用盐水矿化度为30 000 mg/L。

表1 不同矿化度盐水配方组成  
Table1 Composition of the saline solution with different salinities

矿化度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	盐 质 量 / g				蒸馏水 体积/mL
	NaCl	CaCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
6 666	6.191	0.241	0.351	0.070	1 000
30 000	27.307	1.110	3.833	0	1 000
50 000	42.758	2.825	8.917	0	1 000

### 1.2 实验步骤

流变测试实验步骤包括:①将B-PPG干粉配制所需质量分数的悬浮液,静置2 h;②打开仪器和相关软件,选用直径为40 mm的平板连接到仪器上,初始化,设定板间隙为1 000  $\mu\text{m}$ 以及测试温度70  $^{\circ}\text{C}$ ;③向平板上加入一定量的待测B-PPG悬浮液,加入量以使平板下降后能刚好与待测液边缘齐平为准;④选择稳态剪切模式,设定相应的剪切速率、取点间隔、测试时间等参数,测定B-PPG悬浮液

的粘度;⑤将平板抬起,清洗样品后,向平板上重新加入一定量的待测B-PPG悬浮液,选择动态振荡模式,设定相应的频率、振荡应力、取点间隔等参数,测定B-PPG悬浮液的粘弹性。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 B-PPG悬浮液的线性粘弹性

由不同质量分数的B-PPG悬浮液振荡应力扫描曲线(图1)可见:当B-PPG的质量分数为0.25%、振荡应力小于0.5 Pa时,弹性模量( $G'$ )随振荡应力的增加逐渐降低,未出现弹性模量平台区,也就是说质量分数为0.25%的B-PPG悬浮液在测试扫描振荡应力范围内没有线性粘弹区,这是因为B-PPG质量分数太低,线性支化链无法形成有效缠结,分子间作用力太小,难以构建相对稳定的网络结构,因此受振荡应力作用明显;当B-PPG的质量分数增至0.5%时,在振荡应力较小的条件下,弹性模量保持不变,表现出线性粘弹行为,当振荡应力增大到0.26 Pa时,弹性模量逐渐下降,偏离线性粘弹区,即质量分数为0.5%的B-PPG悬浮液在振荡应力小于0.26 Pa之前均处于线性粘弹区;随着B-PPG质量分数的进一步增大,维持线性粘弹区的最大振荡应力增大,这是由于B-PPG质量分数增大,线性支化链增多,分子间作用力增强,体系稳定性相应增强。

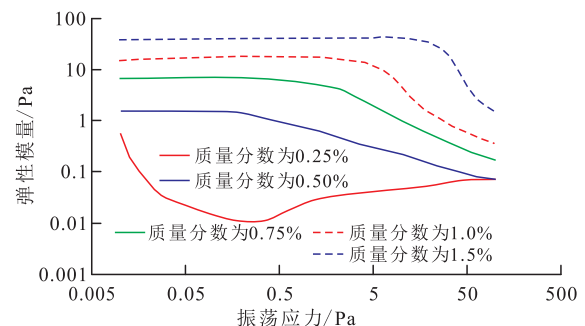


图1 不同质量分数的B-PPG悬浮液弹性模量与振荡应力的关系

Fig.1 Relationship between elastic modulus and oscillating stress of B-PPG suspension with different concentrations

为了发挥B-PPG线性支化链之间的缠结作用,一般选用质量分数为0.5%的B-PPG悬浮液进行研究,因此为保证对其进行的动态振荡测试在线性粘弹区内进行,振荡应力一般选用0.1 Pa进行动态测试。

### 2.2 交联度对B-PPG悬浮液流变性能的影响

选用交联度分别为46.06%, 57.10%, 66.70%和

72.36%的4个B-PPG样品,编号分别为A<sub>2</sub>,A<sub>5</sub>,A<sub>8</sub>和A<sub>9</sub>,与HPAM(编号为A<sub>0</sub>)一起进行稳态剪切和动态振荡测试。

由测试结果(图2)可以看出,随着剪切速率的增加,不同交联度的B-PPG悬浮液粘度整体均呈降低趋势,剪切变稀现象明显,表现出典型的非牛顿流体特性;且随着交联度的增加,B-PPG悬浮液粘度呈下降趋势。这是由于随着B-PPG交联度增加,线性支化链数目及链长相应减少,分子间缠结作用减弱,流体力学体积变小,导致B-PPG悬浮液粘度降低。

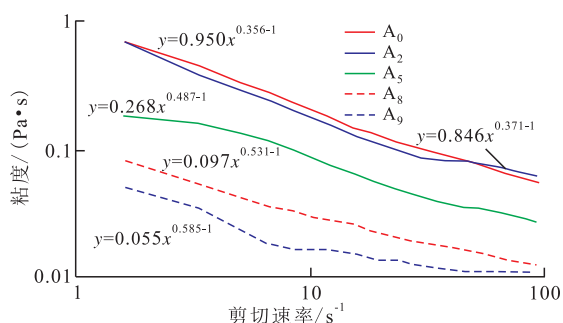


图2 不同交联度的B-PPG悬浮液的粘切曲线

Fig.2 Relationship between viscosity and shear rate of B-PPG suspension with different crosslinked degrees

对图2中粘切曲线进行拟合后发现:①5条曲线均可表示为 $y=Kx^{n-1}$ 的形式,其中 $K$ 为稠度系数,可反映聚合物的增稠能力; $n$ 为流体特性指标,不仅可反映聚合物溶液的假塑性大小,还可反映聚合物粘度对剪切速率的敏感度。②随着交联度的增加,稠度系数减小,流体特性指标逐渐增大,这是因为B-PPG交联度增大,导致线性支化链减少,分子链之间相互缠结作用减弱,因此粘度低且增稠能力变弱;同时高交联度导致交联网络致密且结构稳定,剪切变稀现象减弱,说明剪切速率对高交联度的B-PPG悬浮液粘度影响较小。

分析3种不同交联度的B-PPG样品的动态频率扫描曲线(图3)发现:①随着频率的增加,除A<sub>8</sub>样品在频率大于1.6 Hz后弹性模量呈下降趋势外,其他样品的弹性和粘性模量均呈增加趋势。②对于交联密度较小的A<sub>2</sub>和交联密度较大的A<sub>5</sub>样品,当频率较低时,其粘性模量( $G''$ )大于弹性模量,随着频率的增大,弹性模量增幅较大, $G'$ 与 $G''$ 出现交点,该交点处频率定义为 $F_c$ ;当频率大于 $F_c$ 值时,弹性模量高于粘性模量。③A<sub>2</sub>和A<sub>5</sub>样品 $F_c$ 值分别为4.8和0.582 Hz,A<sub>5</sub>样品交点处频率处于低频;随着B-PPG交联度的进一步增大,在动态频率扫描曲线中无法求出 $F_c$ 值,A<sub>8</sub>样品在低频时就已经表现出弹性占优

的特点,随着频率的增加,弹性模量有所下降,这可能是在累积的振荡应力作用下,交联网络结构有所坍塌所致。事实上, $F_c$ 值是B-PPG悬浮液表现为弹性行为占优或是粘性行为占优的分界点,当频率低于 $F_c$ 值时,B-PPG悬浮液更多地表现出粘性行为,而当频率高于 $F_c$ 值时,则弹性行为所占比例更大。这是由于在低频时,振荡应力作用时间较长,B-PPG有足够的时间通过变形来调整构象,抵消回复产生的应变,同时弹性形变也能在流动过程中逐渐得以回复,因此粘性损耗相对较大;随着频率的增大,振荡应力作用时间缩短,此时弹性形变大部分存储在体系中,粘性损耗的模量则相对较少,表现出弹性模量较高。因此, $F_c$ 值可用以表征B-PPG交联网络结构对频率的敏感程度,交联网络密度越大,交联程度越高, $F_c$ 值越小,越趋向于低频。

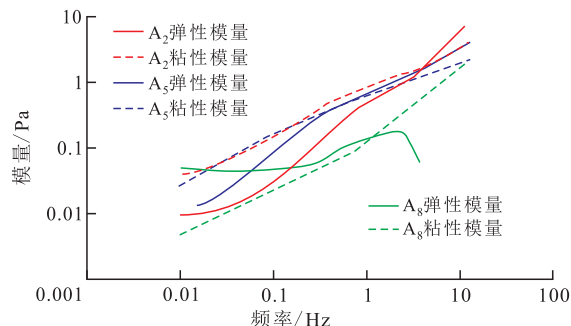


图3 3种不同交联度B-PPG悬浮液动态频率扫描曲线

Fig.3 Dynamic frequency scanning curves of three kinds of B-PPG suspensions with different crosslinked degrees

结果表明,随着B-PPG交联度的增大, $F_c$ 值趋于低频,即B-PPG悬浮液粘度越大, $F_c$ 值越高,这与HPAM溶液呈现的规律相反。李道山等研究HPAM流变性能时发现,随HPAM相对分子质量的增大,HPAM溶液粘度增大, $F_c$ 值降低,二者差异的原因可归因于B-PPG悬浮液与HPAM溶液粘弹性产生的机理不同。对于HPAM溶液,粘弹性的产生源于分子间的相互作用力,包括羧酸根之间的静电排斥力、酰胺基与水分子之间形成的氢键和HPAM分子链之间的范德华力,而B-PPG悬浮液除具有以上作用力外,部分交联结构对于其弹性的贡献更大,因此B-PPG交联度对于 $F_c$ 值的影响最明显。

### 2.3 矿化度对B-PPG悬浮液流变性能的影响

目前中国大多数油田地层条件恶劣,矿化度高,而驱油剂对于盐水往往比较敏感。通过A<sub>5</sub>样品与HPAM在不同矿化度盐水中的粘度随剪切速率的变化曲线,研究矿化度对B-PPG悬浮液粘度的影响。结果(图4)表明,当矿化度由6 666 mg/L增至50 000 mg/L时,HPAM溶液粘度依次降低,而B-



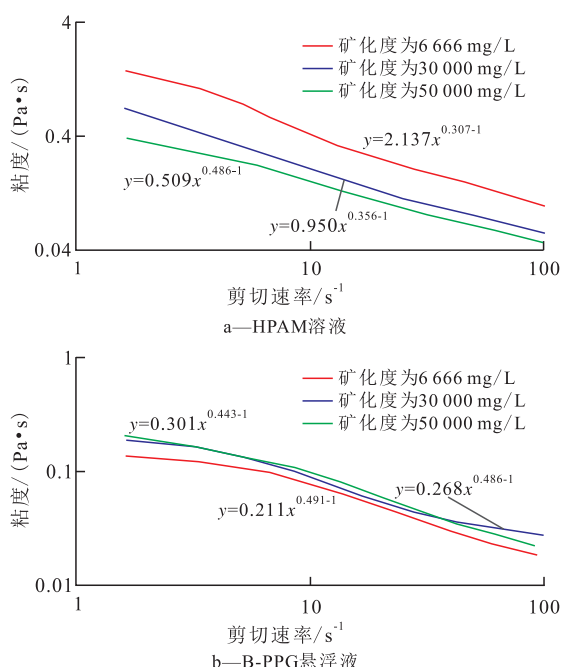


图4 矿化度对HPAM溶液和B-PPG悬浮液粘度的影响

Fig.4 Effect of salinity on the viscosity of HPAM and B-PPG suspension

PPG 悬浮液的粘切曲线变化不大,说明B-PPG具有比HPAM更优异的耐盐性能。

对不同矿化度下 HPAM 溶液与 B-PPG 悬浮液的粘切曲线进行幂律方程拟合(图4)发现,随着矿化度的增加,HPAM 溶液的  $K$  值持续下降,  $n$  值明显增加,而 B-PPG 在不同矿化度盐水中的  $K$  值和  $n$  值却相差不大。这是因为 HPAM 是聚电解质,在溶液中部分酰胺基水解为羧基离子在聚丙烯酰胺分子周围,在溶液中形成扩散双电层,随着矿化度增加,阳离子浓度增大,大量阳离子进入双电层,中和了部分 HPAM 溶液中的羧基的负电性,使分子链间的排斥力减小,导致大分子上电离基团的静电相互作用减弱,分子链更加卷曲,流体力学体积减小,粘度降低;另一方面,矿化度增加,  $Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  等高价金属离子与 HPAM 溶液中的羧基络合交联,从而导致溶液中聚丙烯酰胺分子构象数减少,自组装形态坍塌,部分分子从溶液中沉降析出,粘度降低,因此,随着矿化度的增加,HPAM 的增稠能力减弱;而 B-PPG 由于交联结构的存在,未水解多支化链的分子结构及空间位阻对阳离子进攻双电层和高价金属离子络合羧基离子均有较强的抑制作用,因此, B-PPG 在不同矿化度盐水中  $K$  值和  $n$  值相差不大,表明 B-PPG 具有优良的耐盐性。

由 HPAM 在不同矿化度盐水中的动态频率扫描曲线(图5a)可以看出:随着频率的增加,弹性和粘性模量均呈增加趋势。当盐水矿化度为 6 666

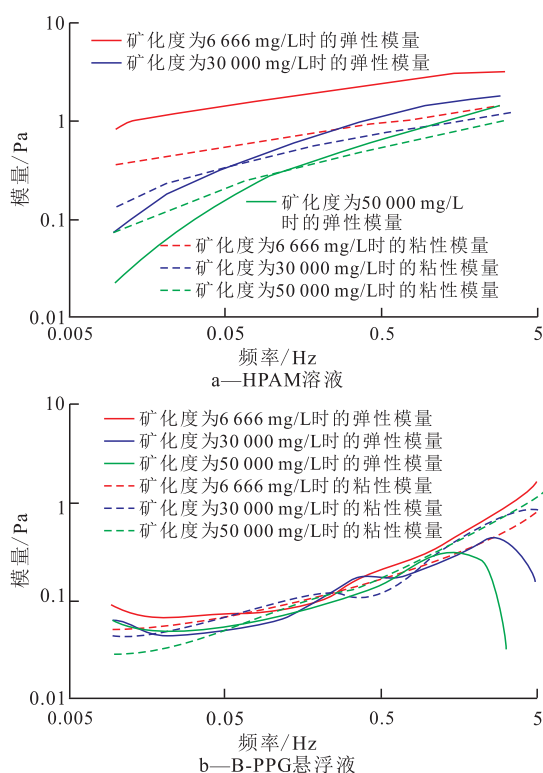


图5 HPAM和B-PPG在不同矿化度盐水中的动态频率扫描曲线

Fig.5 Dynamic frequency scanning curves of HPAM and B-PPG suspension in salt water with different salinities

mg/L时,在测试频率范围内,HPAM 的弹性模量始终大于粘性模量,说明无论在低频还是高频条件下,HPAM 的弹性均大于粘性,不会出现弹性与粘性模量的交叉点;随着盐水矿化度的增加,HPAM 溶液会经历粘性流动占优到弹性流动占优的转变,出现交叉点,矿化度为 30 000 和 50 000 mg/L 时的  $F_c$  值分别为 0.059 和 0.151 Hz,即高矿化度下交叉点频率高,说明此时 HPAM 分子中的羧基与阳离子发生物理交联,分子链收缩,链缠结作用变弱。因此,随着盐水矿化度的增加,HPAM 溶液的弹性减弱。

B-PPG 在不同矿化度盐水中的动态频率扫描曲线(图5b)与 HPAM 相比明显不同,当盐水矿化度从 6 666 mg/L 增至 50 000 mg/L, B-PPG 悬浮液的弹性和粘性模量变化并不明显,高矿化度对其模量影响较小,说明 B-PPG 耐盐性较好。

综上所述, B-PPG 与 HPAM 相比,除具有羧酸根之间的静电排斥力、酰胺基与水分子之间形成的氢键和分子之间的范德华力外,其部分交联结构对于 B-PPG 悬浮液模量的影响更为明显。此外, HPAM 水解度一般大于 20%,酰胺基水解较严重,盐水矿化度增大会导致阳离子与酰胺基物理交联作用加剧,分子链收缩,缠结作用减弱,溶液粘弹性降

低。B-PPG 由于交联结构的存在、未水解多支化链的分子结构及空间位阻对阳离子进攻均有较强的抑制作用,因此 B-PPG 悬浮液的粘弹性受矿化度影响较小。

### 2.4 质量分数对 B-PPG 悬浮液流变性能的影响

对比不同质量分数 B-PPG 悬浮液的粘切曲线及曲线拟合方程(图 6)可以看出,随着 B-PPG 质量分数的增大,B-PPG 悬浮液粘度增大,  $K$  值增加,而  $n$  值略微呈下降趋势,表明随着 B-PPG 质量分数的增大,其悬浮液中支化链分子的缠结更加紧密,增稠能力明显提高,并且支化链间形成的较强作用力使悬浮液更加偏离牛顿流体。

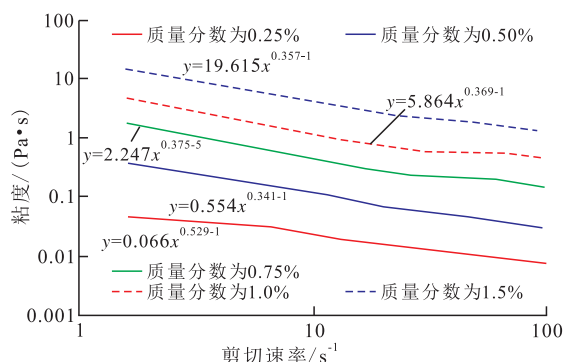


图6 不同质量分数B-PPG悬浮液的粘切曲线

Fig.6 Variation of the shear rate and viscosity of B-PPG suspension with different concentrations

B-PPG 在不同质量分数下的动态频率扫描曲线(图 7)表明:弹性和粘性模量均随频率的增加而增大,且增长趋势随质量分数的增大而减缓。质量分数为 0.5% 的 B-PPG 悬浮液在较宽的测试频率范围内均表现为粘性占优,  $F_c$  值为 2.01 Hz,当频率大于 2.01 Hz 后,弹性占优势;随着 B-PPG 质量分数的增大,  $F_c$  值逐渐趋向低频,当质量分数为 1.5% 时,测试频率范围内未发现粘性弹性的反转点,整条曲线一开始即表现出弹性占优的特点。这是由于质量

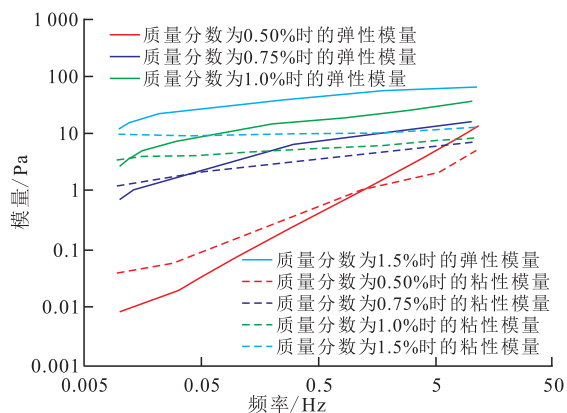


图7 不同质量分数B-PPG悬浮液动态频率扫描曲线

Fig.7 Dynamic frequency scanning curves of B-PPG suspension with different concentrations

分数增大, B-PPG 悬浮液支化链缠结作用增强,交联网络更加密集,在极低频率下就表现出弹性为主导,因此在测试频率范围内无法测出  $F_c$  值。同时,相对稳定的交联网络结构导致 B-PPG 悬浮液对频率的敏感性降低,因此,随着 B-PPG 质量分数的增加,弹性和粘性模量随频率的增速降低。

通过模量—角频率双对数曲线(图 8)及其线性拟合结果(表 2)可以看出,弹性和粘性模量均随 B-PPG 质量分数的增加而增加,且弹性和粘性模量与角频率( $\omega$ )之间均呈幂律变化,不同质量分数下的  $\lg G' - \lg \omega$  曲线斜率为 0.183 ~ 1.109,  $\lg G'' - \lg \omega$  曲线斜率为 0.051 ~ 0.687。从分子结构观点出发,对于凝胶而言,其  $\lg(G', G'') - \lg \omega$  曲线斜率为 0;对于弱凝胶和质量分数较高的悬浮液而言,其斜率为正数,且  $\lg G' - \lg \omega$  的斜率应该大于  $\lg G'' - \lg \omega$  的斜率。从表 2 中的拟合数据可以看出,质量分数为 0.5% ~ 1.5% 的 B-PPG 悬浮液均表现出弱凝胶特性。

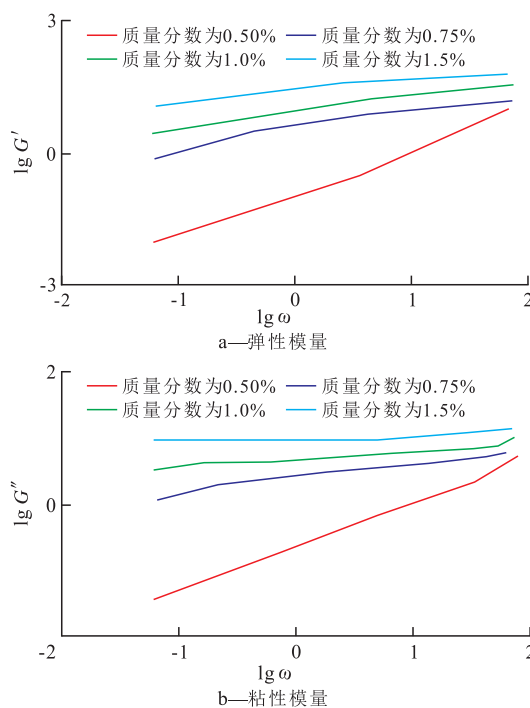


图8 不同质量分数B-PPG悬浮液  $\lg(G', G'') - \lg \omega$  曲线

Fig.8  $\lg(G', G'') - \lg \omega$  curves of B-PPG suspension with different concentrations

表2 不同质量分数B-PPG悬浮液  $\lg(G', G'') - \lg \omega$  曲线线性拟合结果

Table2 Fitting results of  $\lg(G', G'') - \lg \omega$  curve of B-PPG suspension with different concentrations

质量分数, %	$\lg G' - \lg \omega$ 曲线斜率	$\lg G'' - \lg \omega$ 曲线斜率
0.50	1.109	0.687
0.75	0.365	0.208
1.0	0.273	0.114
1.5	0.183	0.051

### 3 结论

随着交联度的增加,B-PPG悬浮液粘度呈下降趋势,增稠能力减弱,剪切变稀现象也减弱;粘性与弹性模量交点处频率逐渐趋向低频,直至在频率测试范围内无法测出。

随着盐水矿化度的增大,B-PPG悬浮液的粘切曲线变化不大;高矿化度使HPAM溶液的弹性明显减弱,但是对B-PPG悬浮液模量影响较小,表明B-PPG比HPAM具有更优异的耐盐性。

随着B-PPG质量分数的增大,B-PPG悬浮液的粘度明显增大,其性能更加偏离牛顿流体,粘性模量与弹性模量交点处频率逐渐趋向低频,直至在测试频率范围内检测不到。 $\lg G' - \lg \omega$ 曲线斜率大于 $\lg G'' - \lg \omega$ 曲线的斜率,质量分数为0.5%~1.5%的B-PPG悬浮液均表现为弱凝胶特性。

#### 参考文献:

- [1] 赵福麟.EOR原理[M].东营:石油大学出版社,2001:2-14.  
Zhao Fulin.Principle of EOR[M].Dongying: University of Petroleum Press,2001:2-14.
- [2] 冷光耀,赵凤兰,侯吉瑞,等.CT技术在改性淀粉凝胶体系运移特征研究中的应用[J].油气地质与采收率,2015,22(2):78-82.  
Leng Guangyao,Zhao Fenglan,Hou Jirui, et al.Application of CT technology in migration characteristics research of modified-starch gel system[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015,22(2):78-82.
- [3] Liu Huiqing,Zhang Hongling,Wang Shulin, et al.Research on mechanisms of steam breakthrough and profile control design for steam soaking well[J].Petroleum Science,2006,3(3):51-55.
- [4] 冯其红,王波,王相,等.多层非均质油藏开发指标预测方法[J].特种油气藏,2014,21(4):85-88.  
Feng Qihong,Wang Bo,Wang Xiang, et al.Prediction approach of development indices of multi-layer heterogeneous reservoir [J].Special Oil & Gas Reservoirs,2014,21(4):85-88.
- [5] Yu H,Wang Y, Ji W.Study of a profile control agent applied in an offshore oilfield[J].Petroleum Science and Technology, 2011, 29(12):1 285-1 297.
- [6] 张官亮,张祖波,刘庆杰,等.利用CT扫描技术研究层内非均质油层聚合物驱油效果[J].油气地质与采收率,2015,22(1):78-83.  
Zhang Guanliang,Zhang Zubo,Liu Qingjie, et al.Study on effects of polymer flooding on layered heterogeneous reservoirs using CT scanning [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1):78-83.
- [7] 王敬,刘慧卿,王增林,等.多孔介质中预交联凝胶颗粒渗流规律模拟[J].中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(3):103-109.  
Wang Jing,Liu Huiqing,Wang Zenglin, et al.Modeling on flowing rules of performed-particle-gel in porous media [J].Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2013, 37(3):103-109.
- [8] He Y,Xiong S,Yang Z.The research on cross-linking polymer gel as in-depth profile control agent[J].Petroleum Science and Technology,2009,27(12):1 300-1 311.
- [9] 赵修太,董林燕,付敏杰,等.橡胶-聚合物冻胶体系堵水适应性分析[J].油气地质与采收率,2014,21(6):84-86.  
Zhao Xiutai,Dong Linyan,Fu Minjie, et al.Adaptability analysis on rubber-gel composite system for water shutoff [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(6):84-86.
- [10] Wang Jing,Liu Huiqing,Wang Zenglin.Experimental investigation on the filtering flow law of pre-gelled particle in porous media [J].Transport in Porous Media,2012,94(1):69-86.
- [11] Yao Chuanjin,Lei Guanglun,Li Lei.Selectivity of pore-scale elastic microspheres as a novel profile control and oil displacement agent[J].Energy & Fuels,2012,26(8):5 092-5 101.
- [12] 孙焕泉,李振泉,曹绪龙,等.粘弹性颗粒驱油剂及其制备方法:中国,101775275 B[P].2013-03-20.  
Sun Huanquan,Li Zhenquan,Cao Xulong, et al.Viscoelastic particle displacement agent and its preparation method: China, 101775275 B[P].2013-03-20.
- [13] 苏智青,姜祖明,黄光速,等.部分交联聚丙烯酰胺的合成机理[J].高分子科学与工程,2012,28(5):53-56.  
Su Zhiqing,Jiang Zuming,Huang Guangsu, et al.Mechanism of forming partially-crosslinked polyacrylamide [J].Polymer Materials Science and Engineering,2012,28(5):53-56.
- [14] 姜祖明,苏智青,黄光速,等.预交联共聚物驱油剂高温高盐环境下长期耐老化机理研究[J].油田化学,2010,27(2):166-170.  
Jiang Zuming,Su Zhiqing,Huang Guangsu, et al.Anti-ageing mechanism for a precrosslinked acrylamide copolymer in high temperature and high salinity aqueous media [J].Oilfield Chemistry,2010,27(2):166-170.
- [15] Su Zhiqing,Jiang Zuming,Huang Guangsu, et al.Mechanism of formation of partially crosslinked polyacrylamide complexes [J].Journal of Macromolecular Science:part B-Physics,2013,52(1):22-35.
- [16] Jiang Zuming,Su Zhiqing,Li Li, et al.Antiaging mechanism for partly crosslinked polyacrylamide in saline solution under high-temperature and high-salinity conditions [J].Journal of Macromolecular Science:part B-Physics,2013,52(1):113-126.
- [17] 孙焕泉.聚合物驱后井网调整与非均相复合驱先导试验方案及矿场应用——以孤岛油田中一区Ng3单元为例[J].油气地质与采收率,2014,21(2):1-4.  
Sun Huanquan.Application of pilot test for well pattern adjusting heterogeneous combination flooding after polymer flooding-case of Zhongyiqu Ng3 block, Gudao oilfield [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(2):1-4.